

УДК 678.067.5:678.674

А. В. Спиглазов, Е. И. Кордикова, Д. С. Гончарёнок

Белорусский государственный технологический университет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
СТЕКЛЯННЫХ ТКАНЕЙ ПОЛИЭФИРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ**

В работе приведен анализ необходимости использования моделирования технологических процессов при отработке новых способов изготовления габаритных изделий из стеклопластиков, в частности при переходе от технологии ручного формования к технологии пропитки под давлением.

Показаны результаты определения основных параметров стекловолокнистого наполнителя (ткань), его поведения под приложенным сжимающим усилием и при изменении пористости пакета. На физической модели изучено течение связующего через образующееся пористое пространство и определены коэффициенты проницаемости в двух направлениях. Определено время пропитки пакета заданных размеров и степени наполнения на определенную глубину. Результаты эксперимента сравнили с результатами численного расчета по модифицированной теории теплопроводности ортотропного тела. Полученные результаты расчета продолжительности пропитки для модельных плоских образцов дают высокие показатели сходимости с результатами эксперимента, что делает возможным использование численных методов для моделирования процесса применительно к реальным конструкциям.

Используя экспериментально полученные данные по коэффициентам проницаемости волокнистой системы, проведен расчет времени полной пропитки реального изделия. В ходе расчетов изменяли исходные данные по прикладываемому давлению и, варьируя схемой подачи и отвода связующего, определили оптимальные параметры, при которых время заполнения порового пространства волокнистой системы не превышает времени жизни связующего.

Моделирование дает возможность визуально наблюдать распределение фронта связующего в ходе процесса пропитки. Применение численного метода позволяет достичь высокого качества изделия и улучшить понимание процесса производства.

Ключевые слова: стеклопластик, пропитка, коэффициент проницаемости, моделирование, время заполнения.

A. V. Spiglazov, E. I. Kordikova, D. S. Goncharyonok

Belarusian State Technological University

**MODELING IMPREGNATION PROCESS OF GLASS FABRICS
BY POLYESTER BINDER UNDER PRESSURE**

The article gives analysis of the need for process simulation when developing new methods of making dimensional products from fiberglass, in particular, during the transition from hand-molding technology to pressure impregnation technology.

In this work the results of determining the basic parameters of filler (fiberglass), its behavior under applied compressive force and change pack porosity are presented. On the physical model we studied the way the resin passes through the porous space and defined coefficients of pro-determined permeability in two directions, time of impregnation of predetermined packet sizes, and degree of filling to a certain depth. The experimental results were compared with the results of numerical calculation of the modified body orthotropic theory of heat conduction. The results of calculation of the duration of impregnation for model plane models provide high of performance of convergence with the results of the experiment, which enables the use of numerical methods for simulation of the process as applied to real structures.

Using the experimental data obtained from the coefficients of permeability of fiber system, we calculated the time of full impregnation of the actual product. During the calculations, we have changed the source data for the applied pressure and, varying the circuit supplying and removing the binder, determined the optimal parameters for which the filling of the pore space of the fiber system does not exceed the lifetime of the binder.

Modeling allows us to observe the distribution of the binder in the flow of resin during the impregnation process. Application of numerical method allows us to achieve high quality products and to improve understanding of the production process.

Key words: fiberglass, impregnation, permeability, modeling, filling time.

Введение. Среди различных синтетических материалов особое место занимают стеклопластики и изделия из них. Для роста объемов применения стеклопластиков в различных отраслях необходимо одновременно повышать технический уровень развития автоматизации и механизации, внедрение новых технологий.

Выбор технологии изготовления конкретного изделия определяется комплексом физико-механических свойств и конечной стоимостью получаемого изделия. Существенным является и возможность серийного выпуска изделий с гарантированным необходимым и контролируемым качеством.

Современные тенденции развития рынка композиционных материалов определяют переход к более дешевым технологиям производства с сохранением высокого качества изделий.

Основная часть. В настоящее время большинство крупногабаритных изделий изготавливаются методом контактного формования, который имеет ряд существенных недостатков: ручной труд, недостаточное качество получаемых изделий, большое количество отходов производства. Как наиболее перспективный метод изготовления изделий из композиционных материалов (КМ) с требуемыми эксплуатационными характеристиками, удовлетворяющий критериям экономичности и экологичности, рассматривается инфузионный метод формования.

Сутью данного технологического процесса является использование разницы давлений подаваемого связующего и стока. Волокнистый наполнитель укладывается на поверхность пуансона и обжимается матрицей до требуемой толщины. В образующуюся замкнутую полость под избыточным давлением нагнетается связующее, которое, проходя по каналам между волокнами наполнителя, осуществляет их пропитку и выходит через сток. Для повышения качества пропитки пакет наполнителя можно предварительно вакуумировать.

Осуществление перехода от одной технологии к другой – сложная задача.

Одной из основных целей математического моделирования технологических систем является прогнозирование на этапе их проектирования основных характеристик и особенностей их функционирования в реальных условиях промышленного производства.

Основными параметрами, влияющими на физико-механические характеристики полимерных композиционных материалов (ПКМ), являются модуль упругости волокнистого наполнителя, его объемное содержание и содержание пор в материале.

Определяющие параметры для моделирования подразделяются на конструкторские и тех-

нологические. К конструкторским относятся параметры, которые закладываются на этапе проектирования изделия: марка используемых армирующих и связующих материалов, требуемые физико-механические свойства изделия, геометрические размеры, соотношение армирующего и связующего материала в готовом изделии и др. Технологическими параметрами являются минимальная вязкость связующего и максимальное время его жизни. Одним из важнейших аспектов контроля технологического процесса является знание режимов переработки связующего.

Абсолютно точную модель сложного процесса построить невозможно. Общепринятым в настоящее время является подход, согласно которому на различных уровнях и этапах моделирования используют различные модели. Это обеспечивает достижение разумного компромисса: сложность модели – точность моделирования. Кроме того, такой подход позволяет достаточно гибко и оперативно проводить сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и уточнять исходные значения, т. е. осуществлять итерационный процесс совершенствования структур с учетом заданных параметров и принятых ограничений.

В настоящей работе объектами исследований являлись стеклянная ткань марки Т 10-80 производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и связующее на основе полиэфирной смолы общего назначения марки ПН-1 и отвердителя ПМЭК. Связующее при нормальных условиях имеет вязкость 1,1 Па·с и время гелеобразования 120 мин.

Тканые наполнители являются упругими пористыми материалами. При формовании изделия наполнитель подвергается деформированию, при этом изменяется толщина пакета, его пористость и, соответственно, степень наполнения.

Из полотнища ткани вырезали одинаковые полоски с размерами 50×50 мм в направлении основы, укладывали в пакеты, состоящие из 15, 20 и 30 слоев между жесткими металлическими пластинами, нагружали сжимающими силами.

Установлено, что изменение относительной толщины пакетов практически не зависит от количества слоев и подчиняется степенной зависимости типа $y = 0,7 \cdot x^{-0,077}$ [1].

Пористость пакета связана с его параметрами следующим выражением:

$$П = 1 - \frac{mn}{\rho H_p},$$

где $П$ – относительная объемная пористость пакета; m – масса единицы площади тканого наполнителя, кг/м²; n – число слоев ткани в па-

кете; ρ – плотность волокна, из которого изготовлена ткань, кг/м^3 ; H_p – толщина пакета при давлении сжатия p , мм.

Операция пропитки волокнистого наполнителя связующим является определяющей при разработке технологического и аппаратного оформления процесса производства изделий из стеклопластиков. В связи с этим важным технологическим показателем стекловолокнистого наполнителя является его проницаемость – величина, характеризующая гидравлическое сопротивление волокнистой пористой среды при течении связующего. Коэффициент проницаемости волокнистого наполнителя зависит от содержания последнего в единице объема и от его ориентации. Обычно коэффициент проницаемости находят экспериментально при исследовании процесса течения модельной ньютоновской жидкости в пористом образце, выполненного из данного вида наполнителя.

Для определения коэффициентов проницаемости исследуемой системы использовали установку, реализующую двухмерное течение жидкости через поровое пространство (рис. 1). Данная установка реализует течение жидкости при подаче ее из центра.

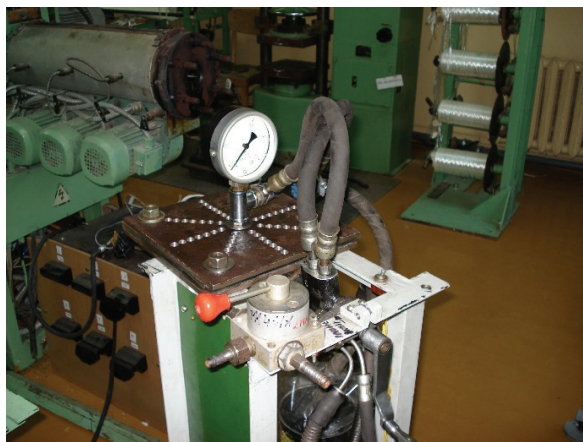


Рис. 1. Общий вид установки для исследования процесса пропитки

Использование образцов в виде кольца позволяет не только упростить и ускорить методику определения коэффициента проницаемости волокнистого наполнителя, но и одновременно определить его деформативность в широком диапазоне изменений объемного содержания посредством изменения толщины образца [2].

Показано, что коэффициенты проницаемости системы не остаются постоянными и зависят от таких факторов, как направление течения (по основе, по утку), время течения, степень наполнения, давление подачи и вязкость жидкости. В процессе течения коэффициенты про-

ницаемости в зависимости от степени наполнения изменяются от $5,59 \cdot 10^{-12}$ до $9,77 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ в направлении основы и от $1,25 \cdot 10^{-11}$ до $2,36 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ в направлении утка.

Результаты экспериментов показывают, что проницаемость системы зависит от многих параметров. Возможно также достижение состояния равновесия, когда приложенного давления недостаточно для дальнейшего прохождения процесса пропитки.

Подача смолы при пропитке может производиться двумя способами: из центра и по каналам по периметру. Полученные экспериментальные значения коэффициентов проницаемости системы использовали при математическом моделировании течения жидкой среды через поровое пространство при расчете времени достижения фронтом определенной глубины.

Полученные данные по времени пропитки для модельного образца указывают на то, что корреляция между расчетом и экспериментом довольно тесная, а это свидетельствует о достоверности полученных результатов. Разброс значений не превышает 10%.

В результате расчетов выявили закономерность, что при подаче смолы из центра время заполнения на порядок больше, чем при подаче смолы по периферии при постоянном давлении и вязкости.

Совокупность полученных результатов, которые показывают адекватность расчетных моделей, дает возможность применить методы математического моделирования для реальных конструкций. В качестве изделия выбрали крышу автомобиля МАЗ. Габаритные размеры составляют 2080×1620 мм. Толщина стенки изделия 5 мм.

При подаче связующего по периметру расчетное время пропитки составило 22 мин. Для уменьшения времени пропитки наполнителя введем дополнительные впускные каналы в центре формы. В результате этого время пропитки уменьшилось до 10 минут. Положение фронта жидкости на начальной стадии пропитки и в конце представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

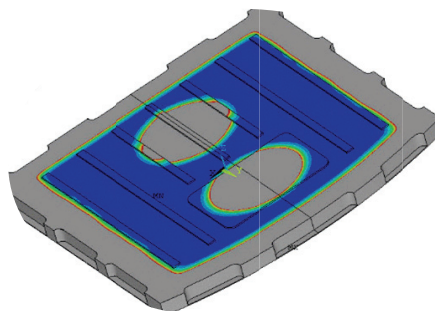


Рис. 2. Положение фронта связующего на начальной стадии пропитки

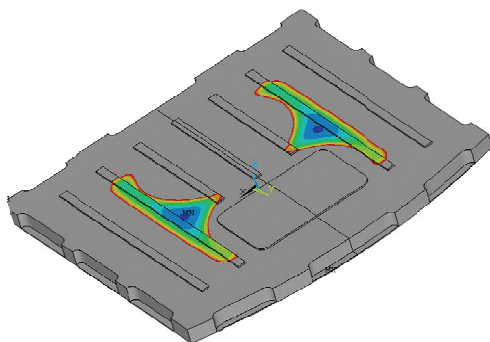


Рис. 3. Положение фронта связующего на конечной стадии пропитки

Анализ результатов эксперимента. Используя численное моделирование в ходе расчетов, определили оптимальную схему производства изделия, варьируя схемой подачи и отвода связующего, расположением вакуумных портов, схемой укладки наполнителя, используемыми материалами (наполнитель, связующее), давлением. В качестве результата расчета можно оценить фронт распределения связующего, наличие сухих зон, время прохождения процесса.

Применение численного метода позволяет достичь высокого качества изделия и улучшить понимание процесса производства.

Литература

1. Кордикова Е. И., Спиглазов А. В. Поведение тканого наполнителя при пропитке под давлением // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. 2008. Вып. XVI. С. 136–138.
2. Спиглазов А. В., Кордикова Е. И. Моделирование процесса пропитки тканых материалов линейно-вязкой жидкостью // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. 2008. Вып. XVI. С. 133–135.

References

1. Kordikova E. I., Spiglazov A. V. The behavior of woven filler in the impregnation under pressure. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IV, Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, 2008, issue XVI, pp. 136–138 (In Russian).
2. Spiglazov A. V., Kordikova E. I. Modeling of the impregnation process of woven materials a linear-viscous liquid. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IV, Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, 2008, issue XVI, pp. 133–135 (In Russian).

Информация об авторах

Спиглазов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: spiglazov@belstu.by

Кордикова Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kordikova@tut.by

Гончарёнок Дмитрий Сергеевич – магистрант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: deggii@mail.ru

Information about the authors

Spiglazov Aleksandr Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: spiglazov@belstu.by

Kordikova Elena Ivanovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kordikova@tut.by

Goncharyonok Dmitriy Sergeevich – Master's degree student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: deggii@mail.ru

Поступила 19.02.2016